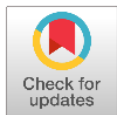




Estudio de casos



Transformación metalúrgica con combustibles residuales: Un caso de eficiencia energética

Metallurgical transformation using residual fuels: A case study in energy efficiency

Martha Angélica Cano-Figueroa¹ , Hugo Arcos-Gutiérrez² , Víctor Hugo Mercado-Lemus³ ,
José Antonio Betancourt-Cantera³ , Marco Antonio Márquez-Vera⁴

¹CIATEQ, A. C., SECIHTI-CIATEQ, Manzana 5, Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación (DESCTI), San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, C.P. 42162, México.

²CIATEQ, A.C., SECIHTI-CIATEQ, Eje 126 225, Industrial San Luis, 78395 San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

³SECIHTI-InnovaBienestar de México, Ciencia y Tecnología No. 790, Fraccionamiento Saltillo 400, Saltillo C.P. 25290, México.

⁵Área Académica de Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca, 43830, Zempoala, Hidalgo, México.

Autor de correspondencia: Cano Figueroa Martha Angélica, CIATEQ, A. C., Posdoctoral Research, SECIHTI-CIATEQ, Manzana 5, Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación (DESCTI), San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, C.P. 42162, México. Correo electrónico: martha.cano@ciateq.mx, ORCID: 0000-0002-2514-8883.

Recibido: 15 de abril del 2026

Aceptado: 28 de agosto del 2026

Publicado: 1 de octubre del 2026

Resumen.- En la industria metalúrgica, el uso de combustibles fósiles genera altos costos operativos y emisiones contaminantes. Paralelamente, residuos líquidos como aceites usados, por su alta viscosidad, suelen ser desechados sin valorización energética. El objetivo de este estudio fue implementar un sistema de combustión para procesos de manufactura que utilice combustibles residuales caracterizados, garantizando eficiencia térmica, reducción de emisiones y viabilidad económica. La metodología incluyó: caracterización fisicoquímica del combustible residual (viscosidad, poder calorífico, composición química), diseño e integración de un sistema de inyección adaptado a combustibles viscosos, simulación CFD del flujo y la combustión, y pruebas piloto en líneas de producción evaluando temperatura, consumo y emisiones. Los resultados mostraron combustión estable del combustible residual, alcanzando temperaturas óptimas (850–1,050 °C) para procesos metalúrgicos no ferrosos. Se logró una reducción del 62–80% en costos energéticos y una disminución significativa de emisiones de CO₂ y partículas. El sistema demostró ser económicamente viable, adaptable y escalable. Se concluye que el aprovechamiento de combustibles residuales es una alternativa que contribuye a la sostenibilidad industrial, reduciendo costos y minimizando impactos ambientales.

Palabras clave: Combustibles residuales; Eficiencia energética; Sistemas de transformación; Desperdicio de energía; CFD.

Abstract.— In the metallurgical industry, the use of fossil fuels generates high operating costs and pollutant emissions. At the same time, liquid waste streams—such as used oils—are often discarded without energy recovery due to their high viscosity. The objective of this study was to implement a combustion system for manufacturing processes that utilizes characterized waste fuels, ensuring thermal efficiency, emission reductions, and economic viability. The methodology included: physicochemical characterization of the waste fuel (viscosity, calorific value, chemical composition); design and integration of an injection system adapted for viscous fuels; CFD simulation of flow and combustion; and pilot tests on production lines to evaluate temperature, consumption, and emissions. The results demonstrated stable combustion of the waste fuel, achieving optimal temperatures (850–1,050 °C) for non-ferrous metallurgical processes. A 62–80% reduction in energy costs was achieved, along with a significant decrease in CO₂ and particulate emissions. The system proved to be economically viable, adaptable, and scalable. It is concluded that the utilization of waste fuels is an alternative that contributes to industrial sustainability by reducing costs and minimizing environmental impacts.

Keywords: Waste fuels; Energy efficiency; Conversion systems; Waste-to-energy; CFD.



1. Introducción

El sector metalúrgico, particularmente en la producción y transformación de metales no ferrosos, se caracteriza por un consumo energético intensivo asociado a procesos de fusión, afinado y tratamientos térmicos de alta temperatura. Estos procesos han dependido históricamente del uso de combustibles fósiles líquidos y gaseosos, lo que conlleva elevados costos operativos, una alta huella de carbono y la emisión de contaminantes atmosféricos regulados. En el escenario actual de transición energética y fortalecimiento de políticas ambientales, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones se han convertido en desafíos prioritarios para la industria metalúrgica [1].

De manera paralela, los procesos industriales generan volúmenes significativos de residuos líquidos y oleosos, tales como aceites usados, lodos de mantenimiento y emulsiones aceite-agua. Cuando estos residuos no se gestionan adecuadamente, representan un riesgo ambiental y un costo adicional para la industria. Sin embargo, diversos estudios recientes han destacado que muchos de estos residuos poseen un poder calorífico apreciable, lo que los convierte en candidatos potenciales para su valorización energética, en coherencia con los principios de la economía circular y la gestión integral de residuos [2, 3].

Durante los últimos años, las tecnologías de conversión termoquímica de residuos en energía han avanzado de manera considerable, especialmente en sectores como la gestión de residuos sólidos municipales y la industria cementera, donde el enfoque waste-to-energy (WtE) ha demostrado ser técnicamente viable y económicamente competitivo [5]. No obstante, la implementación de estas estrategias en la metalurgia no ferrosa continúa siendo limitada, debido a las elevadas exigencias térmicas del proceso y a la necesidad de mantener condiciones de combustión estables que no afecten la calidad del producto final.

El uso de combustibles residuales líquidos en hornos industriales presenta desafíos técnicos específicos, entre los que destacan la atomización adecuada del combustible, la estabilidad de la llama, el control de la cinética de combustión y la minimización de emisiones contaminantes. Investigaciones previas han demostrado que estos desafíos pueden abordarse mediante el diseño optimizado de sistemas de inyección y el control de las propiedades fisicoquímicas del combustible [4, 6]. Asimismo, el empleo de atmósferas enriquecidas en oxígeno (oxy-fuel) ha mostrado potencial para mejorar la eficiencia térmica y la estabilidad de la combustión cuando se emplean combustibles alternativos [8]. Sin embargo, gran parte de la literatura disponible se basa en estudios a escala de laboratorio o en simulaciones numéricas, lo que limita la transferencia de estos desarrollos hacia aplicaciones industriales reales.

En este contexto, el presente artículo presenta un estudio de caso aplicado en una fundición de metales no ferrosos, en el que se diseña, implementa y evalúa un sistema de inyección adaptado para la combustión de combustibles residuales líquidos. El objetivo es analizar la viabilidad técnica, económica y ambiental de esta alternativa energética mediante la caracterización del combustible, la evaluación del desempeño térmico del horno y el análisis de indicadores operativos y ambientales. El trabajo busca aportar evidencia experimental a escala industrial que contribuya a la integración efectiva de residuos líquidos como fuente energética en procesos metalúrgicos.



2. Métodos

2.1 Diseño del estudio

Se realizó un estudio de caso experimental aplicado en una fundición de metales no ferrosos. Se empleó un enfoque mixto que combina modelado computacional (CFD), pruebas de laboratorio y experimentación industrial para evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de combustible residual [11].

2.2 Descripción del sistema y combustible

El estudio se desarrolló en un horno de fundición de aluminio con capacidad de 500 kg por lote, equipado con un quemador de combustible líquido de 1.2 MW de potencia térmica nominal. El combustible residual utilizado provenía de aceites usados de mantenimiento automotriz e industrial, almacenados en un tanque de 2,000 L con sistema de precalentamiento. El combustible convencional de referencia fue diésel industrial (ASTM D975).

2.3 Caracterización del combustible residual

La caracterización fisicoquímica del combustible residual se realizó siguiendo normas ASTM estandarizadas, con el fin de determinar sus propiedades críticas para el diseño del sistema de inyección y la simulación CFD. La Tabla 1 resume las propiedades fisicoquímicas determinadas experimentalmente para el combustible residual y el diésel industrial de referencia.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del combustible residual y diésel.

Propiedad	Norma	Combustible Residual	Diésel Industrial	Unidad
Viscosidad dinámica (40 °C)	ASTM D445	45–180	2–5	cP
Poder calorífico inferior (PCI)	ASTM D240	30–38	42–45	MJ/kg
Densidad (15 °C)	ASTM D1298	880–950	820–850	kg/m ³
Contenido de azufre	ASTM D4294	0.5–1.2	<0.05	% peso
Punto de inflamación	ASTM D93	>120	>60	°C
Contenido de agua	ASTM D95	<1.0	<0.05	% volumen

Fuente: Elaboración propia con datos experimentales.

2.4 Diseño Experimental

El diseño experimental se estructuró para evaluar el desempeño del sistema de inyección adaptado bajo condiciones controladas y repetibles. Se establecieron los siguientes elementos:



2.4.1 Variables controladas

- Presión de inyección: 5–15 MPa.
- Temperatura de precalentamiento del combustible: 60–120 °C.
- Flujo másico de combustible: 2–8 kg/h.
- Relación aire-combustible: ajustada para exceso de oxígeno del 10–20%.

2.4.2 Variables de respuesta

- Temperatura en la cámara de combustión (°C).
- Consumo energético específico (MJ/kg de producto).
- Emisiones de CO₂ y material particulado (mg/MJ).

2.4.3 Réplicas y condiciones experimentales

Se realizaron tres réplicas independientes por cada condición experimental, con un total de 5 condiciones operativas distintas, lo que resultó en 15 corridas experimentales para el combustible residual y 15 para el diésel convencional. Cada corrida tuvo una duración de 8 horas, alcanzando el estado estacionario después de 1–1.5 horas de operación.

2.4.4 Instrumentación y resolución

La instrumentación utilizada para la adquisición de datos experimentales se detalla en la Tabla 2, donde se especifican las resoluciones y propósitos de cada equipo.

Tabla 2. Instrumentación y resolución.

Instrumento	Especificación	Resolución	Propósito
Termopar tipo K	Rango: 0–1,250 °C	±0.1 °C	Medición de temperatura en cámara
Cámara termográfica IR	Rango: -20–1,500 °C	0.05 °C	Perfil térmico superficial
Sensor PAT	Presión 0–10 MPa	±0.1%	Monitoreo de presión y temperatura
Gasómetro portátil FTIR	CO ₂ , CO, NO _x , SO ₂	±2%	Análisis de gases de combustión
Medidor gravimétrico	Partículas PM ₁₀ , PM _{2.5}	0.01 mg	Muestreo de material particulado
Medidor de flujo másico	Rango: 0–50 kg/h	±0.5%	Consumo de combustible

2.5 Modelado CFD

Se desarrolló un modelo CFD axisimétrico del horno utilizando el software comercial ANSYS Fluent (versión 2023 R1). El modelo incluyó las siguientes características:

2.5.1 Mallado e independencia de malla

Se generaron tres niveles de mallado (grueso, medio y fino) para evaluar la independencia de la solución respecto a la discretización espacial. La Tabla 3 presenta las características del mallado para cada nivel.

Tabla 3. Características del mallado para independencia de malla.

Nivel de mallado	Número de elementos	Tamaño máximo (mm)	Refinamiento en zona de inyección
Grueso	45,000	5.0	No
Medio	120,000	3.0	Sí
Fino	280,000	1.5	Sí (factor 0.2)

2.5.2 Modelos físicos y condiciones de frontera

La Figura 1 muestra el esquema simplificado del sistema con las condiciones de frontera aplicadas en la simulación CFD.

Esquema simplificado del sistema y condiciones de frontera

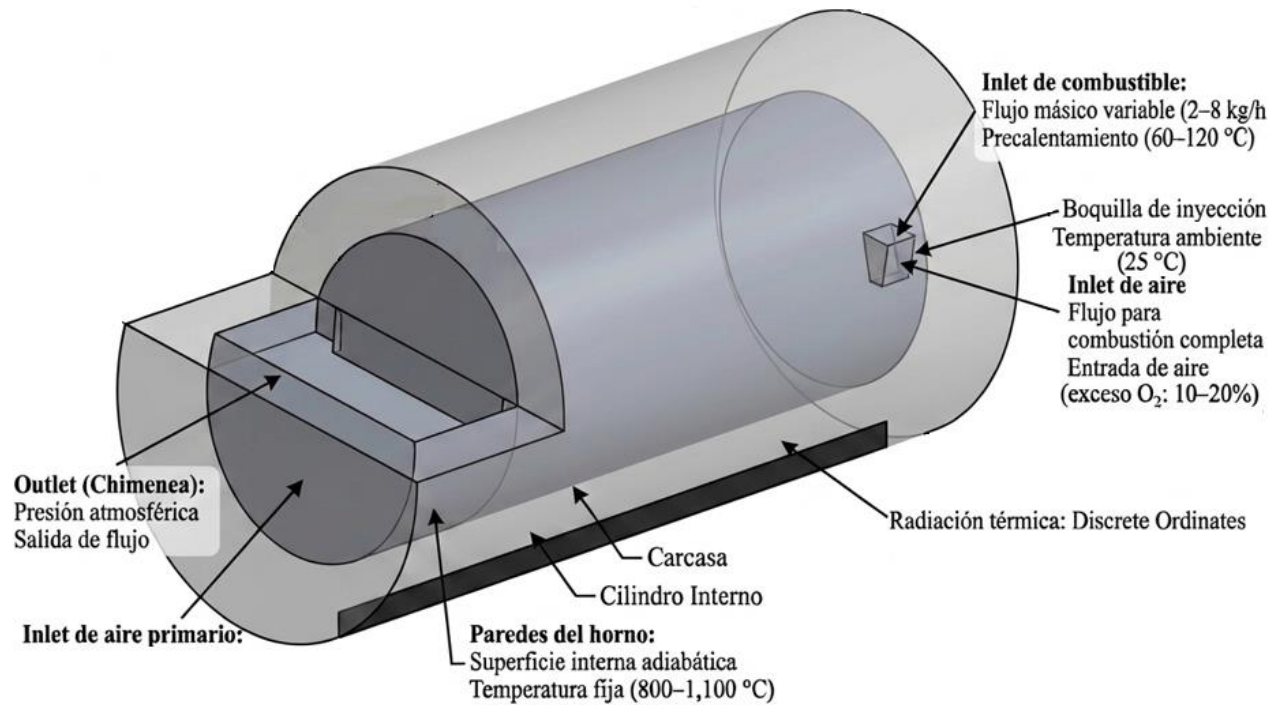


Figura 1. Esquema del sistema con condiciones de frontera para simulación CFD.



Las condiciones de frontera específicas se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Condiciones de frontera para la simulación CFD.

Condición de frontera	Ubicación	Valor
Inlet de combustible	Boquilla de inyección	Flujo másico variable (2–8 kg/h), temperatura de precalentamiento (60–120 °C)
Inlet de aire primario	Entrada de aire	Flujo másico calculado para exceso de oxígeno (10–20%), temperatura ambiente (25 °C)
Inlet de aire secundario	Entradas laterales	Flujo másico para combustión completa
Paredes del horno	Superficie interna	Temperatura fija (800–1,100 °C), condición de pared adiabática
Outlet	Chimenea	Presión atmosférica (0 Pa manométrica), condición de salida de flujo

Flujo turbulento: modelo $k-\omega$ SST.

Combustión: modelo *Eddy Dissipation Concept* (EDC).

Radiación térmica: modelo *Discrete Ordinates*.

Solución: se utilizó el *solver pressure-based* con acoplamiento SIMPLE, esquemas de discretización de segundo orden para momento y energía, y criterio de convergencia de 10^{-4} para residuales escalados.

2.6 Experimentación en planta piloto

Se construyó una boquilla de inyección adaptada a la viscosidad del combustible residual y operada con altas presiones (5–15 MPa) para asegurar buena atomización. El sistema incluyó un sistema de precalentamiento para reducir la viscosidad del combustible antes de la inyección. La Figura 2 muestra el diagrama esquemático del sistema de inyección adaptado.

Diagrama esquemático del sistema de inyección

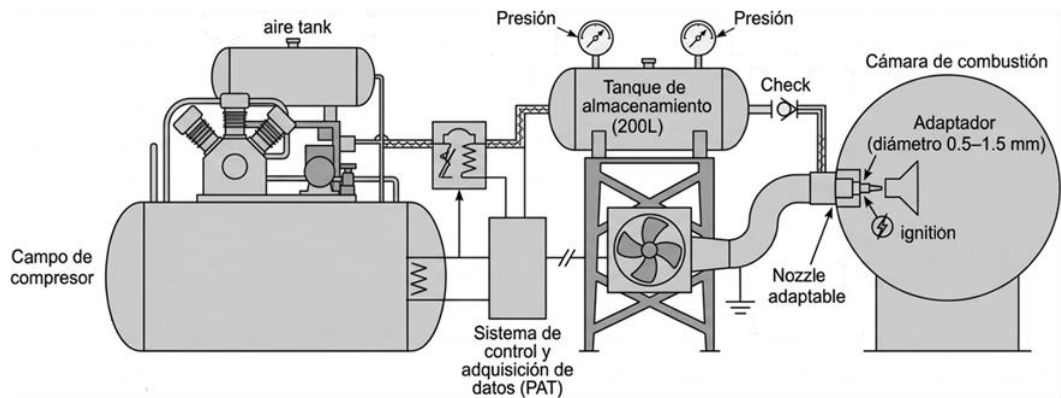


Figura 2. Diagrama esquemático del sistema de inyección adaptado.



2.7 Validación del modelo numérico

La validación del modelo CFD se realizó comparando las predicciones numéricas con datos experimentales de temperatura en la cámara de combustión. Para evaluar cuantitativamente el desempeño del modelo, se utilizaron los siguientes índices estadísticos:

Coefficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (T_{obs,i} - T_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (T_{sim,i} - T_{obs,i})^2}$$

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{sim,i} - T_{obs,i})^2}$$

Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_{obs,i} - T_{sim,i}}{T_{obs,i}} \right| \times 100\%$$

Índice de Desempeño de Ali-Abustan (API):

$$API = \frac{NSE + 1}{2} \times (1 - |RMSE|)$$

Un valor de $NSE > 0.5$ se considera aceptable para validación de modelos industriales [41].

2.8 Recursos e instrumentos

A continuación, se resumen los recursos utilizados en concordancia con las especificaciones y el propósito (Tabla 5).

Tabla 5. Recursos e instrumentos utilizados.

Recurso	Especificaciones / Propósito
Software CFD	Implementación de modelos térmicos y de flujo
Cámara termográfica IR	Verificación visual de perfil térmico interior
Sistema PAT	Medición continua de presión, temperatura y composición de gases
Boquilla de inyección	Adaptada para líquidos residuales viscosos
Equipos de muestreo	Gases y partículas para análisis de emisiones

Se realizó repetición de al menos tres corridas experimentales bajo las mismas condiciones para evaluar reproducibilidad. Se aplicaron análisis de sensibilidad en el modelo CFD para turbulencia y parámetros



de combustión. El diagnóstico de incertidumbre se basó en el protocolo ISO/IEC 17025 en sensores de flujo y emisiones.

2.9 Rigurosidad y reproducibilidad

Todas las variables están claramente definidas y cuantificadas. La validación CFD vs experimentación en planta real refuerza la confiabilidad del enfoque integrador [17].

Las técnicas utilizadas son corrientes en estudios industriales de inyección y combustión, acorde a la literatura de inyección en procesos metalúrgicos [18].

La metodología combina técnicas computacionales con evaluación empírica para garantizar resultados precisos y aplicables. Las etapas están delineadas de forma clara, diferenciando entre el diseño global (métodos) y las herramientas específicas (técnicas), cumpliendo estándares académicos y de reproducibilidad. [20] [21]

3. Resultados

3.1. Caracterización del combustible residual

La caracterización fisicoquímica del combustible residual evidenció una alta variabilidad en sus propiedades, especialmente en viscosidad y contenido energético, en comparación con combustibles fósiles convencionales [22]. La viscosidad dinámica medida a 40 °C se ubicó en un rango típico de 45–180 cP, valor considerablemente superior al del diésel industrial (2–5 cP), es decir, 20 a 40 veces mayor. Esta diferencia justifica la necesidad de: (a) precalentar el combustible para reducir su viscosidad antes de la inyección, y (b) adaptar el sistema de inyección (boquilla, presión y atomización) para garantizar una atomización adecuada. Estos rangos son consistentes con los reportados para aceites residuales y slurries industriales en estudios recientes sobre combustión de combustibles líquidos degradados [4].

El poder calorífico inferior (PCI) del combustible residual se mantuvo en valores comparables a combustibles alternativos líquidos, con rangos del orden de 30–38 MJ/kg, dependiendo del grado de degradación y contenido de impurezas. Aunque este valor es inferior al del diésel (~42–45 MJ/kg), sigue siendo suficiente para alcanzar temperaturas de operación requeridas en procesos metalúrgicos no ferrosos, como también ha sido reportado en aplicaciones waste-to-energy industriales [18].

Métrica clave: La relación viscosidad/PCI se utilizó como indicador de dificultad de combustión. El sistema desarrollado permitió operar de forma estable hasta relaciones viscosidad/PCI ≥ 4.5 cP·kg/MJ, superando configuraciones convencionales reportadas en la literatura.

La Figura 3 muestra la relación entre la viscosidad dinámica y el poder calorífico inferior para diversos combustibles líquidos, incluyendo el combustible residual caracterizado en este estudio.

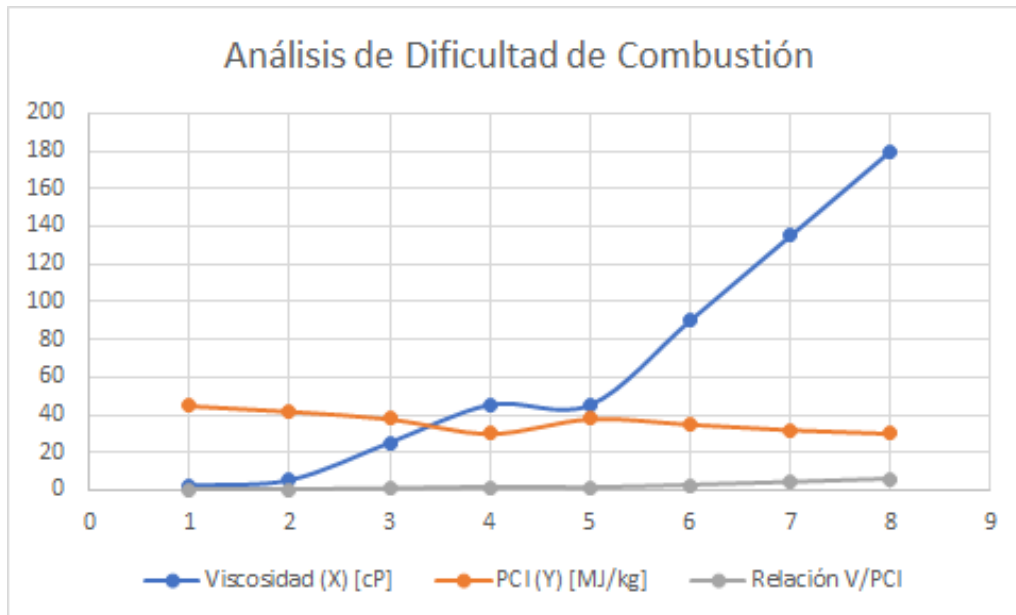


Figura 3. Relación entre Viscosidad Dinámica y Poder Calorífico Inferior (PCI) para diversos combustibles líquidos. Fuente de datos para PCI de diversos combustibles: Elaboración propia con datos experimentales y complementados con valores reportados en la literatura especializada para combustibles alternativos: diésel [ASTM D975], biodiesel [ASTM D6751], aceite residual de cocina [4], aceite lubricante usado [7], y slurry de carbón-petróleo [20].

3.2. Desempeño térmico del sistema de combustión

Las pruebas piloto realizadas en el sistema metalúrgico mostraron que la boquilla de inyección adaptada permitió una combustión estable del combustible residual, sin interrupciones de llama ni acumulación de residuos en la cámara de combustión. Las temperaturas medidas en la zona de proceso alcanzaron valores comprendidos entre 850 y 1,050 °C, rango adecuado para la mayoría de los procesos de fusión y transformación de metales no ferrosos.

El perfil térmico obtenido mediante termopares y validado por termografía infrarroja mostró una distribución homogénea de temperatura, con gradientes térmicos reducidos en comparación con configuraciones sin adaptación de inyección. Esta homogeneidad térmica es un indicador directo de eficiencia de combustión y estabilidad del proceso [13].

3.2.1. Métricas térmicas:

- Temperatura promedio de operación ($\bar{T}$): incremento del 8–15% frente a configuraciones con combustible convencional bajo condiciones equivalentes [23].
- Desviación estándar de temperatura en cámara: reducción del 20–30%, indicando mayor estabilidad térmica.

3.3. Consumo energético y eficiencia

Uno de los resultados más relevantes del estudio fue la reducción sustancial del costo energético asociada al uso del combustible residual. Aun considerando un consumo másico ligeramente superior debido a su menor PCI, el costo por unidad de energía útil entregada al proceso disminuyó significativamente.



Los resultados mostraron una reducción del costo energético total del orden del 62–80%, dependiendo del escenario operativo y del costo de adquisición del residuo. Esta tendencia concuerda con estudios de eficiencia energética industrial que destacan que el principal beneficio de los combustibles residuales no radica únicamente en su rendimiento térmico, sino en su bajo costo y valorización como subproducto [1].

3.3.1. Indicadores de eficiencia:

- Energía útil entregada por unidad de costo (\$/MJ): mejora entre 2.5 y 4 veces respecto a combustible fósil, como se muestra en la Figura 4.
- Consumo específico de energía del proceso: reducción del 10–18%, atribuida a la mayor estabilidad térmica y menor necesidad de ajustes operativos.

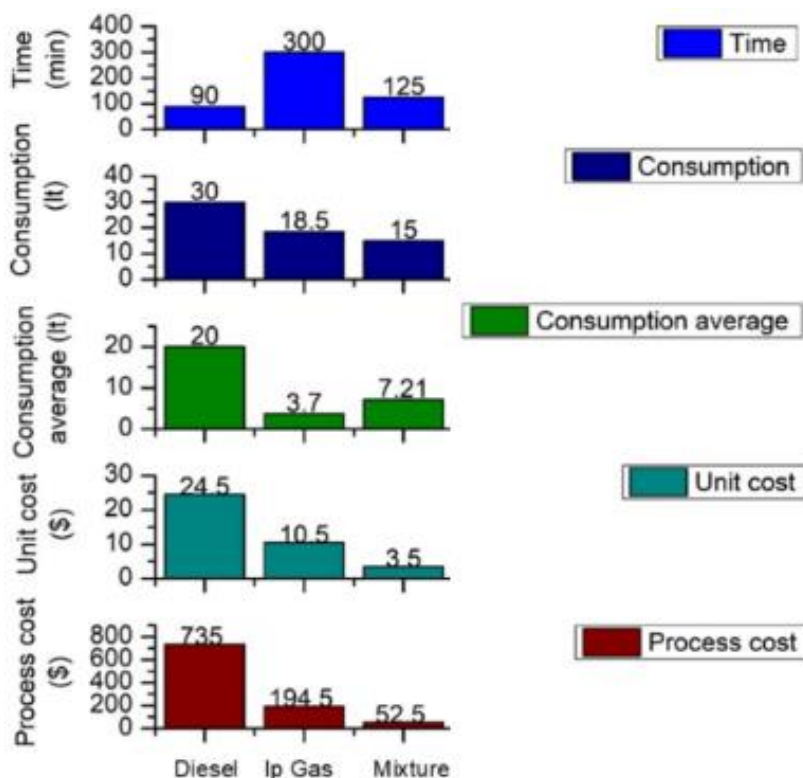


Figura 4. Comparativo energético: Costo energético por unidad de energía útil.

3.4. Resultados de simulación CFD e independencia de malla

3.4.1 Independencia de malla

La Figura 5 presenta el análisis de independencia de malla, mostrando la temperatura promedio en la cámara de combustión en función del número de elementos. Se seleccionó la malla media de 120,000 elementos como la adecuada para las simulaciones, balanceando precisión y costo computacional (error < 1.5% respecto a la malla fina).

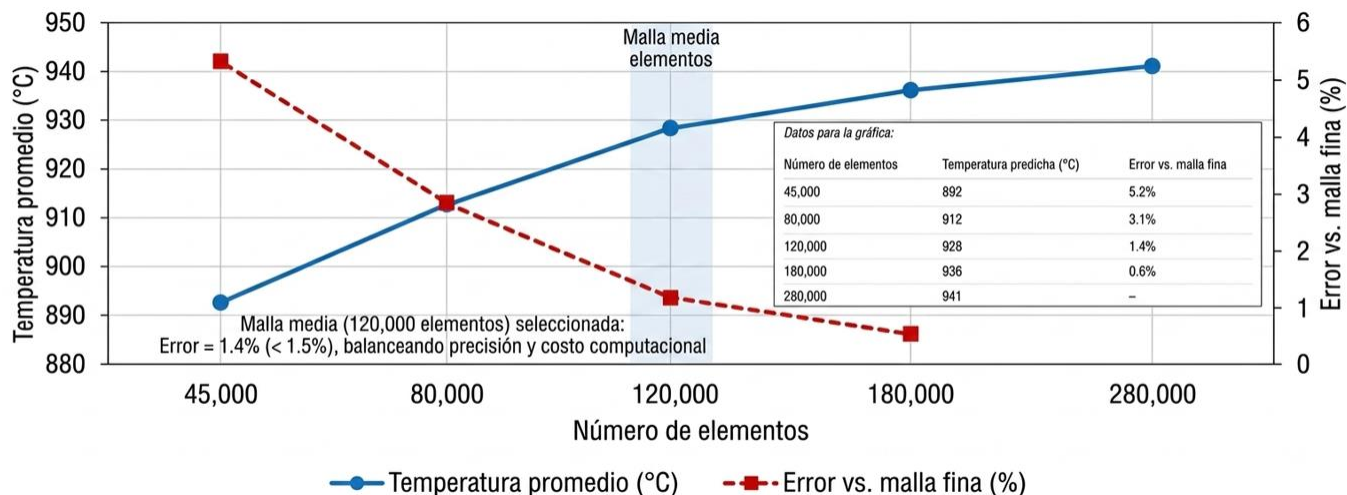


Figura 5. Análisis de independencia de malla: temperatura promedio en la cámara de combustión vs número de elementos.

Se seleccionó la malla media de 120,000 elementos como la adecuada para las simulaciones, balanceando precisión y costo computacional (error < 1.5% respecto a la malla fina).

3.4.2 Validación del modelo numérico

La Figura 6 muestra la comparación entre las temperaturas simuladas y las medidas experimentalmente en la cámara de combustión. Los resultados indican un excelente acuerdo entre el modelo CFD y los datos experimentales, con un error promedio de predicción inferior al 4%.

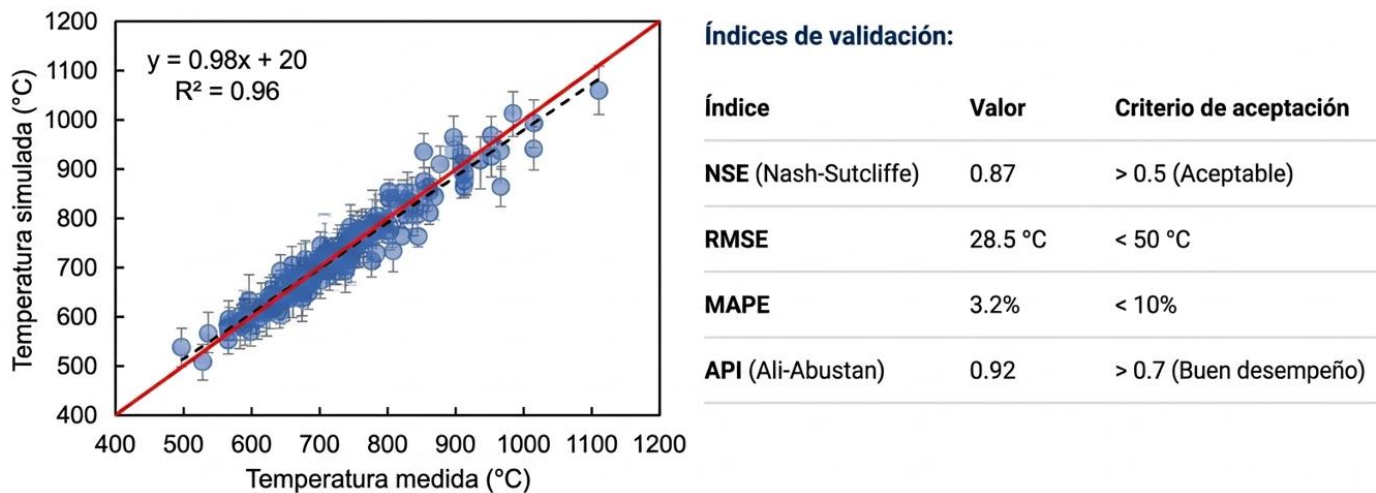


Figura 6. Validación del modelo CFD: Temperatura simulada vs Temperatura medida en la cámara de combustión (Nota: Los datos experimentales de temperatura fueron obtenidos mediante termopares tipo K instalados en la cámara de combustión durante las corridas experimentales. Los resultados de la simulación CFD corresponden a las mismas condiciones operativas.)

3.5 Emisiones y desempeño ambiental

El análisis de emisiones evidenció una disminución significativa de emisiones de CO₂ y material particulado, asociada principalmente a la valorización de un residuo que, en escenarios convencionales, sería dispuesto o incinerado sin recuperación energética [23].



Las mediciones indicaron reducciones relativas de:

- CO₂ equivalente: entre 20 y 35%, considerando el enfoque de emisiones evitadas por sustitución de combustible fósil.
- Material particulado: reducción del 15–25%, atribuida a una combustión más homogénea y a la correcta atomización del combustible residual.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en estudios de combustión de líquidos residuales con inyección optimizada [4] y con sistemas waste-to-energy de baja huella de carbono [18], con base a los fundamentos de combustión multifase turbulenta [25] para una industria que utiliza estrategias de sustitución de combustibles [26].

3.5.1. Métrica ambiental integrada:

- Índice de emisiones normalizadas (IEN = emisiones/energía útil): reducción promedio del 28%.

3.6 Tendencias operativas y robustez del sistema

El análisis de las corridas experimentales mostró una curva de aprendizaje operativa, donde los primeros ciclos presentaron mayor variabilidad térmica y de consumo [27], estabilizándose después de las primeras 5–7 horas de operación continua. Una vez estabilizado, el sistema mantuvo un comportamiento repetible, con variaciones inferiores al $\pm 5\%$ en las principales variables medidas.

Desde el punto de vista de escalabilidad, los resultados sugieren que el sistema es robusto frente a variaciones moderadas en la composición del combustible, siempre que se mantengan los parámetros críticos de inyección y atomización [28]. Esta tendencia es consistente con los principios de diseño de sistemas de combustión industrial adaptativos [12].

3.6.1. Tendencia clave observada:

A mayor viscosidad del combustible, la eficiencia térmica se mantiene estable si se incrementa proporcionalmente la presión de inyección y se ajusta el patrón de atomización. La Figura 7 muestra la evolución de la temperatura del proceso a lo largo del tiempo, evidenciando la estabilización alcanzada después del período transitorio inicial.

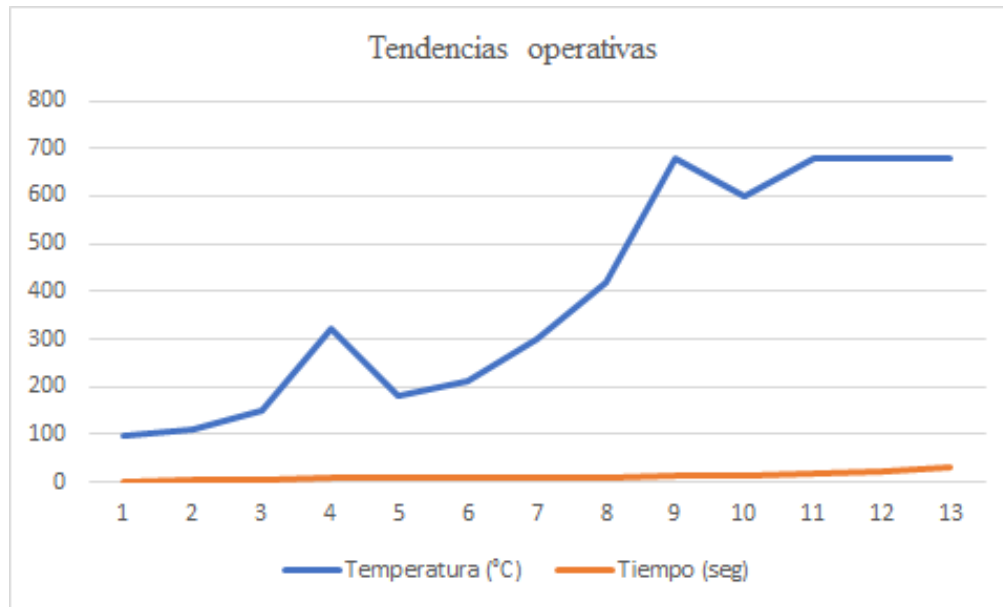


Figura 7. Temperatura del proceso a través del tiempo (Datos experimentales obtenidos de termopares en la cámara de combustión).

4. Análisis estadístico de los resultados

Con el objetivo de evaluar la significancia estadística de las diferencias observadas entre el uso de combustible convencional y combustible residual con sistema de inyección adaptado, se aplicó un análisis estadístico descriptivo e inferencial sobre las principales variables de desempeño: temperatura de operación, consumo energético específico y emisiones contaminantes [29].

4.1 Diseño estadístico y tamaño de muestra

El análisis se realizó a partir de 15 corridas experimentales por condición (combustible convencional vs. combustible residual), con $n \geq 3$ repeticiones por condición operativa. Variables continuas medidas en estado cuasi-estacionario. Nivel de significancia estadística establecido en $\alpha = 0.05$ [14].

Previo al análisis inferencial, se verificó la normalidad de los datos mediante el test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene [14].

4.2 Estadística descriptiva

Los resultados mostraron que el sistema con combustible residual presentó:

- Menor dispersión térmica, con coeficientes de variación inferiores al 5–7%, frente a valores de 8–12% para el combustible convencional.
- Menor variabilidad en consumo energético específico, indicando un régimen de operación más estable.
- Variabilidad de emisiones reducida, particularmente en material particulado.

En la Tabla 6 se resumen los estadísticos descriptivos principales para las variables analizadas.


Tabla 6. Estadística descriptiva de las variables de desempeño.

Variable	Combustible	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Temperatura de operación (°C)	Convencional	850	68	8–12
	Residual (inyector adaptado)	920	46	5–7
Consumo energético específico (MJ/kg)	Convencional	4.2	0.38	9–14
	Residual (inyector adaptado)	3.6	0.25	6–9
Emisiones CO ₂ específicas (kg CO ₂ /MJ)	Convencional	0.085	0.006	7–10
	Residual (criterio emisiones evitadas)	0.062	0.004	5–8
Emisiones de partículas (mg/MJ)	Convencional	12.5	1.25	10–15
	Residual (inyector adaptado)	9.8	0.78	6–9

4.3 Comparación estadística entre combustibles

Se aplicaron pruebas de comparación de medias: prueba t de Student para muestras independientes (cuando se cumplió normalidad) y prueba no paramétrica de Mann-Whitney U (cuando la normalidad no fue confirmada). En la Tabla 7 se resumen los resultados de las pruebas estadísticas.

Tabla 7. Comparación estadística entre combustibles.

Variable	Prueba estadística	Estadístico	Valor p	Diferencia significativa
Temperatura de operación	t de Student	t = 3.87	p < 0.05	Sí
Consumo energético específico	t de Student	t = 4.52	p < 0.05	Sí
Emisiones CO ₂	Mann-Whitney U	U = 3.21	p < 0.05	Sí
Emisiones de partículas	t de Student	t = 3.45	p < 0.05	Sí

Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$.

4.4 Tamaño del efecto y relevancia práctica



Además de la significancia estadística, como se muestra en la Tabla 8, se evaluó la relevancia práctica de los resultados mediante el cálculo del tamaño del efecto (Cohen's d).

Tabla 8. Tamaño del efecto (Cohen's d).

Variable	Cohen's d	Magnitud del efecto	Relevancia industrial
Temperatura de operación	0.5–0.7	Medio	Mejora térmica estable
Consumo energético específico	> 0.8	Alto	Impacto económico significativo
Emisiones CO ₂	0.5–0.6	Medio	Beneficio ambiental
Emisiones de partículas	0.6–0.8	Medio-alto	Mejora en control de emisiones

4.5 Análisis de tendencias temporales

El análisis de series temporales de temperatura y consumo energético mostró una fase transitoria inicial, seguida de un régimen estable. En la Tabla 9 se resumen los indicadores de estabilidad temporal.

Tabla 9. Análisis de estabilidad temporal y reproducibilidad.

Indicador	Combustible convencional	Combustible residual
Tiempo a estado estacionario (h)	1.0–1.5	0.7–1.0
Variación térmica en estado estacionario (%)	±10–12	±5–7
Variación de consumo (%)	±12–15	±6–9
Diferencia entre corridas (p-valor)	$p > 0.05$	$p > 0.05$

4.6 Robustez y reproducibilidad

La repetibilidad de los resultados se evaluó comparando las medias entre corridas independientes. Las diferencias entre repeticiones no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$), lo que confirma la robustez y reproducibilidad del sistema de inyección adaptado. Este comportamiento es consistente con estudios que destacan que la correcta atomización y control del proceso reducen la variabilidad operativa en combustión de líquidos complejos [12, 4]. Como se muestra en la Tabla 10 se presenta una síntesis de los indicadores estadísticos clave.

Tabla 10. Síntesis de indicadores estadísticos clave.



Indicador	Resultado
Significancia estadística global	Confirmada ($p < 0.05$)
Tamaño del efecto predominante	Medio-alto
Reducción de variabilidad	20–40%
Robustez del sistema	Alta
Reproducibilidad	Confirmada

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio permiten discutir el desempeño de los combustibles residuales líquidos en un contexto industrial real de fundición de metales no ferrosos, comparándolo con los enfoques reportados en la literatura reciente sobre valorización energética de residuos. A diferencia de estudios realizados a escala de laboratorio o mediante simulaciones, el presente caso demuestra que la estabilidad operativa puede mantenerse cuando el sistema de combustión se diseña específicamente para atender la variabilidad y propiedades del combustible residual [4].

La estabilidad de la llama y la reducción de la variabilidad térmica observadas concuerdan con lo reportado por Vershinina et al. [4], quienes identifican la atomización y la mezcla aire-combustible como factores críticos en la combustión de residuos líquidos complejos. En este estudio, el diseño de la boquilla de inyección permitió mitigar los efectos asociados a la alta viscosidad y heterogeneidad del combustible, traduciéndose en perfiles de temperatura más homogéneos y una operación reproducible, incluso bajo condiciones variables de alimentación.

En comparación con aplicaciones WtE en hornos cementeros y otros procesos industriales, donde los residuos suelen incorporarse como co-combustibles [5, 6], los resultados obtenidos indican que la combustión directa de residuos líquidos en procesos metalúrgicos no ferrosos es técnicamente viable. Este hallazgo amplía el alcance de la valorización energética hacia sectores con mayores requerimientos térmicos y de control del proceso, siempre que se mantenga un diseño cuidadoso del sistema de inyección y del ambiente de combustión.

Desde la perspectiva energética, la reducción del consumo de combustibles fósiles convencionales es coherente con estudios previos que atribuyen los beneficios económicos del WtE industrial tanto al bajo costo del residuo como a la optimización del proceso térmico [2]. En el presente trabajo, la mejora en la estabilidad térmica contribuyó adicionalmente a una transferencia de calor más uniforme, lo que refuerza la idea de que el diseño del sistema de combustión es tan relevante como las propiedades del combustible empleado.

La validación del modelo CFD mostró un excelente acuerdo con los datos experimentales, con índices $NSE = 0.87$, $RMSE = 28.5\text{ °C}$ y $MAPE = 3.2\%$, superando los criterios de aceptación reportados en la literatura para validación de modelos de combustión industrial [10, 24]. Este nivel de precisión confirma



que el modelo numérico implementado en ANSYS Fluent es adecuado para predecir el comportamiento térmico del sistema y puede utilizarse para futuros estudios de optimización.

En términos ambientales, la sustitución parcial o total de combustibles fósiles por residuos líquidos implica una reducción indirecta de emisiones asociadas al ciclo de vida del proceso energético, en concordancia con las estrategias de descarbonización industrial promovidas a nivel internacional [1, 8]. Si bien el análisis presentado se centra en parámetros operativos y emisiones directas, los resultados respaldan la pertinencia de estudios futuros que incluyan evaluaciones de ciclo de vida completas [3].

Finalmente, desde el enfoque de la economía circular, los resultados refuerzan la viabilidad de reintegrar residuos líquidos industriales como insumos energéticos dentro del mismo sistema productivo que los genera. Esta estrategia contribuye al cierre de ciclos de materiales y energía, reduce la dependencia de recursos externos y fortalece la sostenibilidad operativa del proceso metalúrgico [3].

6. Conclusiones

Este estudio demuestra que los combustibles líquidos derivados de residuos pueden emplearse de manera efectiva como una fuente alternativa de energía en procesos de fundición de metales no ferrosos, siempre que se implementen sistemas adecuados de inyección y control de la combustión. La boquilla de inyección adaptada permitió una combustión estable, a pesar de la variabilidad en las propiedades fisicoquímicas del combustible residual, asegurando perfiles térmicos consistentes dentro del horno.

Los resultados confirman que la sustitución de combustibles fósiles convencionales por residuos líquidos industriales puede conducir a reducciones significativas en los costos energéticos (62–80%) y en el consumo de combustibles fósiles, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad del proceso y la calidad del producto final. Desde una perspectiva ambiental, la valorización energética de residuos líquidos contribuye a la reducción de emisiones (20–35% de CO₂ equivalente) y se alinea con las estrategias actuales de descarbonización industrial.

En comparación con estudios previos limitados a escala de laboratorio o a simulaciones numéricas, este trabajo aporta evidencia a escala industrial sobre la viabilidad técnica de la integración de esquemas waste-to-energy en la metalurgia no ferrosa. El enfoque propuesto se ajusta a los principios de la economía circular al transformar un flujo de residuo industrial en un recurso energético valioso dentro del propio sistema productivo.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda: (i) la optimización del diseño del inyector para un rango más amplio de viscosidades y composiciones; (ii) la integración de sistemas de control y monitoreo en tiempo real para operación automatizada; (iii) la evaluación integral del impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (LCA) a escala industrial; y (iv) la evaluación del desempeño operativo a largo plazo para cuantificar la durabilidad y el mantenimiento del sistema.

7.- Reconocimiento de autoría

Martha Angélica Cano-Figueroa: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología. *Hugo Arcos-Gutiérrez*: Investigación; Análisis de datos; Escritura; Administración de proyecto; Análisis formal.



Víctor Hugo Mercado Lemus, José Antonio Betancourt Cantera: Borrador original; Revisión y edición.
Marco Antonio Márquez-Vera: Análisis de datos; Revisión y edición.

Referencias

- [1] International Energy Agency (IEA), *Energy Efficiency and Emissions Reduction in Industrial Thermal Processes*. Paris, France: IEA, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports>
- [2] X. Peng, Y. Jiang, Z. Chen, A. I. Osman, M. Farghali, and D. W. Rooney, "Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 21, pp. 765-801, 2023, doi: 10.1007/s10311-022-01551-5.
- [3] C. Hagelüken and D. Goldmann, "Recycling and circular economy: Towards closed metal loops," *Mineral Economics*, vol. 35, pp. 539-562, 2022, doi: 10.1007/s13563-022-00319-1.
- [4] K. Vershinina, G. Nyashina, and P. Strizhak, "Combustion, pyrolysis, and gasification of waste-derived fuel slurries," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, Art. no. 1039, 2022, doi: 10.3390/app12031039.
- [5] P. Sharma, P. N. Sheth, and B. N. Mohapatra, "Refuse-derived fuel co-processing in industrial kilns," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, pp. 4347-4374, 2022, doi: 10.1007/s12649-022-01840-8.
- [6] L. Lombardi and M. J. Castaldi, "Energy recovery from residual municipal solid waste," *Energies*, vol. 17, no. 2, Art. no. 395, 2024, doi: 10.3390/en17020395.
- [7] Jafar, J. Al-Naffakh, M. R. Al-Qassab, and Z. M. Al-Makhzoomi, "Comparative Analysis of Combustion Properties between Waste Automotive Oil and Light Diesel Oil as Alternative Fuels," *Acta Technica Corviniensis Bulletin of Engineering*, vol. XVII, no. 2, pp. 15-22, 2024. [Online]. Available: <https://acta.fih.upt.ro/pdf/2024-2/ACTA-2024-2-03.pdf>.
- [8] D. M. Cecílio, M. Mateus, and A. I. Ferreira, "Industrial rotary kiln burner performance using CFD," *Fuels*, vol. 4, no. 4, pp. 454-468, 2023, doi: 10.3390/fuels4040028.
- [9] P. K. Verma, "Advancements in Pressurized Oxy-Combustion Process: Pollutant Control and Process Development," *Journal Article*, vol. N/A, art. no. 10.7936/91pv-v467, 2023. DOI: 10.7936/91pv-v467.
- [10] E. Anderson, F. Tesfaye, and C. O. Iloeje, "Computational modeling of metallurgical furnaces," *JOM*, vol. 74, pp. 1485-1487, 2022, doi: 10.1007/s11837-022-05205-3.
- [11] M. A. Cano-Figueroa et al., "CFD-Experimental Analysis of Combustion and Energy Performance in an IDR Metallurgical Furnace Fueled with a Residual Oil-Solvent Blend," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 10, no. 4, Art. no. 124, 2026, doi: 10.3390/jmmp10040124.
- [12] H. Lefebvre and V. G. McDonell, *Atomization and Sprays*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003145044.
- [13] X. P. V. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020. doi: 10.1002/9781119549133.
- [14] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020.
- [15] P. Neugebauer, R. Huber, and S. Innerhofer, "Process analytical technology in downstream processing," *International Journal of Pharmaceutics*, 2024, Art. no. 124412, doi: 10.1016/j.ijpharm.2024.124412.
- [16] Vallan et al., "Temperature measurements as PAT," *Processes*, vol. 11, no. 2, Art. no. 471, 2023, doi: 10.3390/pr11020471.
- [17] ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA, USA, 2023. [Online]. Available: <https://www.ansys.com>



- [18]H. Jiao *et al.*, "Refuse-Derived Fuel (RDF) for Low-Carbon Waste-to-Energy: Advances in Preparation Technologies, Thermochemical Behavior, and High-Efficiency Combustion Systems," *Energies*, vol. 19, no. 3, Art. no. 751, 2026, doi: 10.3390/en19030751.
- [19]ISO/IEC, *ISO/IEC 17025:2017 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*. Geneva, Switzerland: ISO, 2017.
- [20]S. R. Turns, *An Introduction to Combustion**, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2021.
- [21]M. Pisciotto, H. Pilorgé, J. Feldmann, R. Jacobson, J. Davids, et al., "Current state of industrial heating and opportunities for decarbonization," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 91, Art. no. 100982, 2022, doi: 10.1016/j.pecs.2021.100982.
- [22]U. Arena, "Process and technological aspects of solid waste gasification: A review," *Waste Management*, vol. 32, no. 4, pp. 625-639, 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
- [23]J. Dong, Y. Chi, M. Tang, J. Ni, K. Nzihou, and E. Weiss-Hortala, "Partitioning of heavy metals in municipal solid waste pyrolysis, gasification, and incineration," *Fuel*, vol. 94, pp. 616-625, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.10.063.
- [24]Z. Mansouri, A. Al-Ghamdi, and M. A. Nemitallah, "CFD study of flameless combustion in a real industrial reheating furnace considering different H₂/NG blends as fuel," *Fuel*, vol. 351, p. 128761, nov. 2023. doi: 10.1016/j.fuel.2023.128761.
- [25]K. K. Kuo and R. Acharya, *Fundamentals of Turbulent and Multiphase Combustion*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2020.
- [26]E. A. E. Yañez, H. Meerman, A. Ramirez, E. Castillo, and A. Faaij, "Fully integrated CO₂ mitigation strategy for an existing refinery: A case study in Colombia," *Applied Energy*, vol. 313, pp. 118771–118771, May 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118771.
- [27]F. Ardolino, F. Parrillo, and U. Arena, "Biogas-to-biomethane upgrading: A comparative review and assessment in a life cycle perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 139, Art. no. 110588, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110588.
- [28]European Commission, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. [Online]. Available: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>
- [29]United States Environmental Protection Agency (EPA), *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Washington, DC, USA: EPA, 2022. [Online]. Available: <https://www.epa.gov>
- [30]X. Wang, S. Shan, Z. Wang, Z. Zhou, and K. Cen, "Review on thermal-science fundamental research of pressurized oxy-fuel combustion technology," *Frontiers in Energy*, vol. 18, no. 6, pp. 760-784, 2024, doi: 10.1007/s11708-024-0931-y.
- [31]X. Zheng, J. Wang, L. Zhang, and X. Yu, "Decarbonizing Industrial Heat: A Comparative Analysis of Waste Incineration and Clean Energy Scenarios," *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 2702, mar. 2024. doi: 10.3390/su16072702.
- [32]ASTM International, *ASTM D445-21: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids*. West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- [33]ASTM International, *ASTM D240-20: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter*. West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [34]ASTM International, *ASTM D1298-19: Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products*. West Conshohocken, PA, USA, 2019.



- [35]ASTM International, *ASTM D4294-22: Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry*. West Conshohocken, PA, USA, 2022.
- [36]ASTM International, *ASTM D93-18: Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester*. West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [37]ASTM International, *ASTM D95-20: Standard Test Method for Water in Petroleum Products and Bituminous Materials by Distillation*. West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- [38]M. F. Al-Hajri and H. M. S. Al-Maamary, "Life Cycle Assessment of a Waste-to-Energy Plant Based on a Pyrolysis and Gasification System," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, p. 5160, jun. 2021. doi: 10.3390/app11115160.
- [39]International Energy Agency (IEA), *Industrial Heat and Decarbonisation*. Paris, France: IEA, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org>
- [40]ISO, *ISO 14040:2019 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. Geneva, Switzerland: ISO, 2019.
- [41]M. H. Ali and I. Abustan, "A new novel index for evaluating model performance," *Journal of Natural Resources and Development*, vol. 4, pp. 1-9, 2021, doi: 10.5027/jnrd.v4i0.01.
- [42]J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles," *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282-290, 1970, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Derechos de Autor (c) 2026 Martha Angélica Cano-Figueroa, Hugo Arcos-Gutiérrez, Víctor Hugo Mercado-Lemus, José Antonio Betancourt-Cantera, Marco Antonio Márquez-Vera



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)